

Interaktive Visualisierung und Validierung geophysikalischer Daten in virtuellen Umgebungen

Björn Zehner Stephen Barrass John Plate
Martin Göbel Bernd Fröhlich

GMD – Forschungszentrum für Informationstechnik

ZUSAMMENFASSUNG

Mit geophysikalischen Meßmethoden erkunden Geologen und Geophysiker den Untergrund. Die bekanntesten Verfahren sind Seismik und Logging. Die Interpretation der ermittelten Daten erfolgt heute fast ausschließlich an Standard Workstation Arbeitsplätzen. Da die Daten und das daraus zu erstellende Untergrundmodell aber komplexer dreidimensionaler Natur sind, bietet sich hier der Einsatz stereoskopischer Darstellungen und die direkte Interaktion mit dem Modell im dreidimensionalen Raum an.

Im Rahmen eines Erdölkonsortiums experimentieren wir deshalb mit Methoden der virtuellen Realität zur interaktiven Exploration geophysikalischer Daten und deren Integration mit dem geologischen Befund. Unser Prototyp erlaubt die Nutzung verschiedener VR Systeme, wie Responsive Workbenches oder CAVEs. Die Steuerung der Anwendung erfolgt über dreidimensionale Eingabegeräte, beispielsweise einen frei im Raum beweglichen Zeigestift und die neu entwickelte Cubic Mouse. Die Cubic Mouse unterstützt intuitives Navigieren innerhalb des Modells und die Festlegung orthogonaler Schnitte durch die Seismik. Außerdem experimentieren wir mit einer Kombination aus Visualisierungs- und Sonifizierungstechniken zur Logdatenerkundung, um Benutzern die hohe Datendichte und große Anzahl gemessener Attribute zugänglich zu machen.

Experten aus der Öl- und Gasindustrie haben unser System bei verschiedenen Gelegenheiten erprobt und evaluiert. Die Resonanz war äußerst positiv. Großes Interesse besteht an der Cubic Mouse und unseren interaktiven Werkzeugen zur Bohrlocherkundung. Es gibt inzwischen sogar erste Anzeichen, daß Teile unserer Ideen in kommerzielle Systeme aufgenommen werden.

1. EINFÜHRUNG

Die Lösung geologischer Probleme erfordert möglichst genaue Kenntnis des dreidimensionalen Untergrundaufbaus. Zu dessen Erkundung werden meist geophysikalische Meßverfahren eingesetzt, die petrophysikalische Parameter des Gesteins bestimmen. Beispiele für diese Parameter sind die Schallgeschwindigkeit, die Geschwindigkeit elektromagnetischer Wellen, der elektrische Widerstand des Gesteins und dessen natürliche Radioaktivität. Im Bereich der Erdölexploration, beziehungsweise der Charakterisierung und des Managements von Reservoirs sind die 3D-Seismik und Bohrlochmessungen mit Abstand die wichtigsten Methoden (Sheriff, 1992). Bei der Seismik werden Schallwellen erzeugt und in den Untergrund geschickt. Aus den an die Oberfläche zurückkehrenden Reflexionen erhält man eine Volumenrepräsentation des Untergrundes. Bohrlochmessungen geben Aufschluß über den exakten Untergrundaufbau entlang einer Bohrung. Sie ermöglichen die Zuordnung der in der Seismik sichtbaren Reflektoren zu den stratigrafischen Einheiten. Interpreten erstellen auf Basis dieser Daten ein Untergrundmodell, das in Zusammenhang mit den aus verschiedenen Messungen gewonnenen Daten beurteilt werden muß, um eine genaue Vorstellung des Untergrundes zu bekommen.

Zur Interpretation, Visualisierung und Evaluierung dieser oft komplexen dreidimensionalen Strukturen setzt man heute größtenteils Standard Workstations ein, obwohl stereoskopische Projektionen und die direkte Interaktion mit dem Modell im dreidimensionalen Raum die mentale Modellbildung vereinfachen könnten. Diese Überzeugung hat sich insbesondere in der Erdölindustrie durchgesetzt, die zunehmend großflächige Projektionssysteme anschafft. Allerdings gibt es keine kommerziellen Systeme, die ein direktes dreidimensionales Arbeiten mit diesen Systemen erlauben, so daß sie sich nur als übergroße Monitore einsetzen lassen, die weiterhin mit Tastatur und Maus bedient werden.

Im Rahmen eines Erdölkonsortiums experimentieren wir daher mit Methoden der virtuellen Realität zur interaktiven Erkundung und Interpretation geophysikalischer Daten. Unser Anwendungsprototyp (siehe Abb. 1) ermöglicht die integrierte Darstellung und Bearbeitung der im Feld gemessenen Daten mit den interpretierten, geologischen Modellen (Verwerfungen, stratigrafische Horizonte). Unser Prototyp wurde bereits mehrfach Experten aus der Erdölindustrie in verschiedenen virtuellen Umgebungen, wie Responsive Workbenches (Abb. 2 und Krüger & Fröhlich, 1994), CAVEs (Abb. 3 und Cruz-Neira et al., 1993) und Visionarien vorgeführt und sehr gut aufgenommen. Das ist umso bemerkenswerter, da er nur einen Bruchteil der Funktionalität kommerzieller Softwaresysteme

aus diesem Bereich realisiert. Dies hat uns ermutigt erste Experimente für ähnliche geophysikalischen Methoden durchzuführen, die mehr in der Umweltgeophysik als im Öl- und Gasbereich Verwendung finden. So werden zum Beispiel im oberflächennahen Bereich häufig Verfahren wie Geoelektrik, Hammerschlagseismik, Georadar und Magnetik eingesetzt, die zur Erkundung von archäologischer Fundstellen (z.B. Sambuelli et al., 1999) oder Mülldeponien (z.B. Green et al., 1999) dienen können. Hier sehen wir großes Potential für den Einsatz virtueller Umgebungen, da die Problemstellungen ähnlich sind und in naher Zukunft VR-Technologie auch mit gut ausgestatteten Standard PCs zu betreiben sein wird.

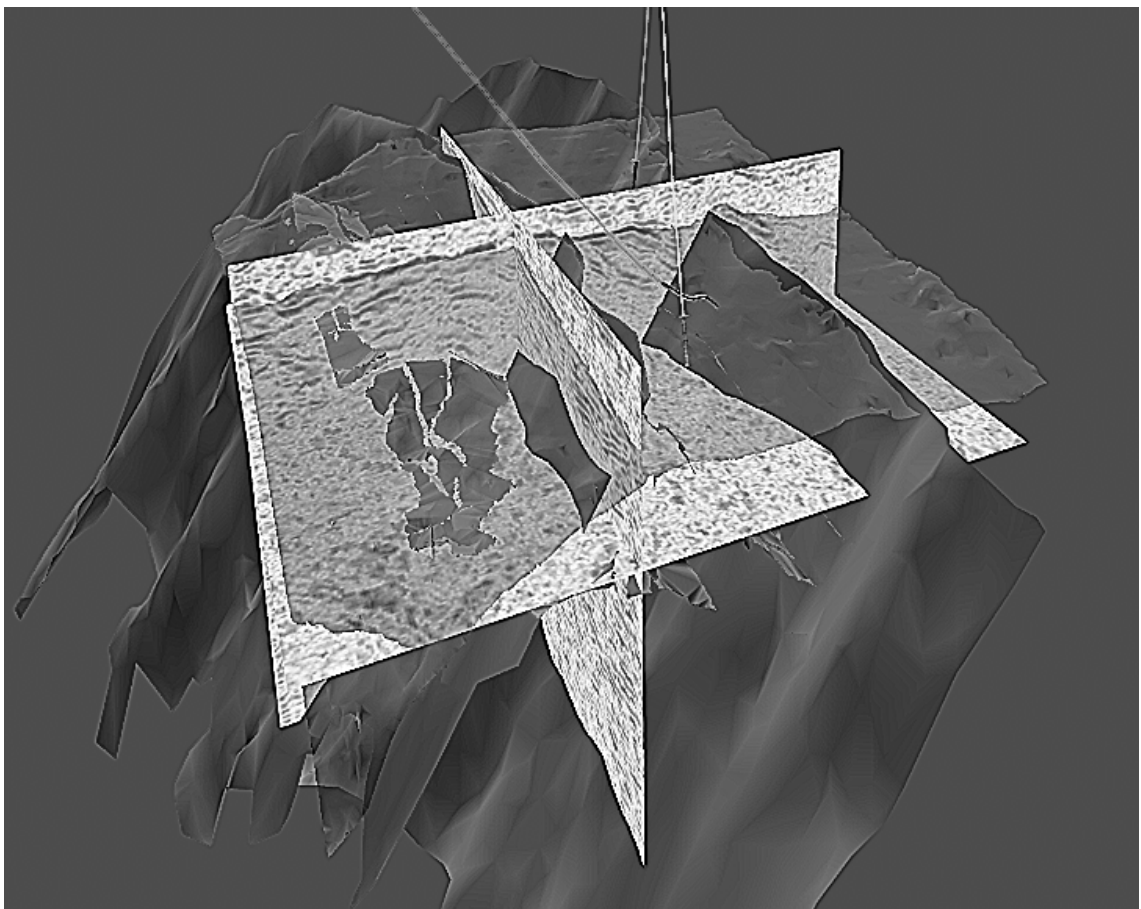


Abb. 1: Ein Ausschnitt des Gulfaks Reservoirs in der Nordsee mit stratigraphischen Horizonten, Verwerfungen und Schnitten durch die 3D-Seismik.

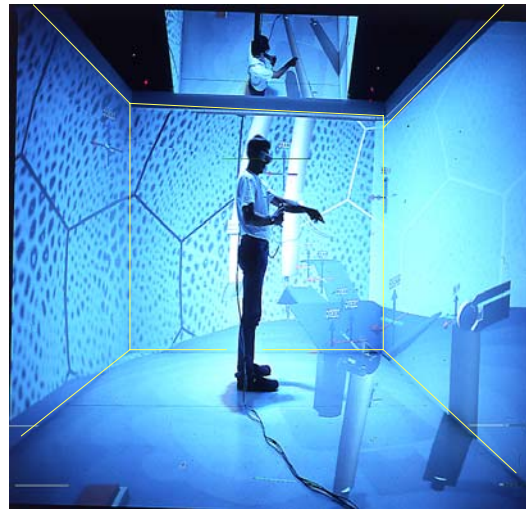
2. ANDERE ARBEITEN

Das VETL an der Universität Houston beschäftigt sich seit geraumer Zeit mit der Visualisierung von Daten aus dem Öl- und Gasbereich (Loftin et al., 1999) und ist sicher einer der Pioniere auf diesem Gebiet. Das CSIRO in Canberra, Australien, untersucht den Einsatz haptischer Ausgabegeräte zur Interpretation seismischer Daten (Stevenson et al., 1997). Die sogenannte Haptic Workbench ist ein VR-System, das mit einem Phantom Force Feedback Gerät integriert ist. Dadurch wird das Fühlen seismischer Daten möglich. Daneben gibt es Bestrebungen GOCAD, ein in der Erdölindustrie weit verbreitetes Modellierungspaket, in virtuellen Umgebungen nutzbar zu machen. Einige Öl- und Gasfirmen versuchen sich auch an Eigenentwicklungen, da kommerzielle Software ihren Anforderungen momentan noch nicht entspricht.



Abb. 2: Die Collaborative Responsive Workbench: Stereoskopische Bilder werden von der Rückseite auf zwei senkrecht zueinander stehende Projektionsflächen projiziert. Dies hat gegenüber einer einseitigen Workbench den Vorteil, daß man das virtuelle Modell im Raum vor sich darstellen kann. Es entsteht ein wesentlich größeres Interaktionsvolumen.

Abb. 3: Die CAVE: Ein 3*3*3 Meter großer Raum, bei dem stereoskopische Bilder auf drei Wände und den Boden projiziert werden. Acht Lautsprecher sorgen für einen räumlichen Klangeindruck.



3. IMPLEMENTIERUNG

Unsere Prototyp baut auf Avocado auf, einem bei der GMD entwickelten Framework für verteilte VE Anwendungen (Tramberend et al., 1999). Avocado ist in C++ implementiert und setzt auf SGI Performer auf. Das System erlaubt die Nutzung derselben Anwendung mit verschiedenen VR-Umgebungen, wie z.B. CAVEs, Responsive Workbenches oder Visionarien. Objekte und ihre Funktionalität (z.B. ein Objekt Bohrloch oder ein Objekt 3D-Seismik) werden als Knoten in Avocado realisiert und in einer Anwendung zu einem Szenegraphen zusammengefügt. Der Zustand einzelner Objekte wird, ähnlich wie in VRML, durch Felder beschrieben (z.B. Farbe, Transformationsmatrix). Die Felder können miteinander verbunden werden um Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Objekten zu spezifizieren. Der Zusammenbau des Szenegraphen, also daß Erzeugen einzelner Objekte und das Setzen und Verbinden der Felder, erfolgt interaktiv oder in Skripten mit der Interpretersprache Scheme. Dies ermöglicht einen schnellen Entwicklungsprozeß (rapid prototyping), da sich die Applikation zur Laufzeit ändern läßt, statt sie jedesmal neu zu kompilieren und zu starten.

Zur Interaktion mit den Daten verwenden wir speziell entwickelte Eingabegeräte und das Konzept des virtuellen Werkzeugs (Tramberend et

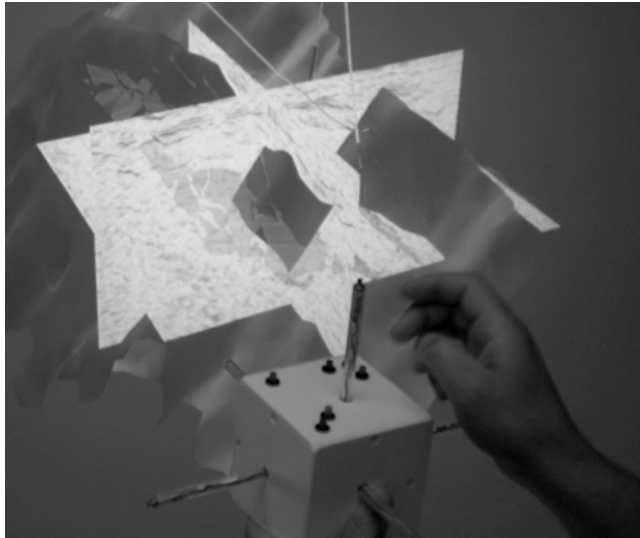


Abb. 4: Die Cubic Mouse

al., 1999). Benutzer des Systems verwenden einen Zeigestift, der mit einem oder mehreren Knöpfen ausgestattet ist und dessen Position und Orientierung kontinuierlich durch einen Sensor für sechs Freiheitsgrade (6 DOF Sensor) ermittelt wird. Durch ein virtuelles Werkzeug wird dem Zeigestift eine bestimmte Funktionalität zugeordnet. Mit einem Löschwerkzeug lassen sich Objekte durch Knopfdruck löschen, ein

Bewegwerkzeug erlaubt die freie Bewegung eines virtuellen Objektes im Raum, ein Skalierwerkzeug vergrößert oder verkleinert ein Objekt, usw.

Die Cubic Mouse (Abb. 4) ist ein würfelförmiges Eingabegerät, dessen Lage im Raum ebenfalls durch einen 6 DOF Sensor kontinuierlich ermittelt wird. In unserer Anwendung haben wir die Orientierung der Seismik an die Orientierung der Cubic Mouse gekoppelt. Da die Cubic Mouse wie auch die Seismik würfel- bzw. quaderförmig sind, hat man damit gewissermaßen die Seismik in der Hand, was eine ausgesprochen intuitive Kon-trolle des Modells erlaubt. Zwei Knöpfe an der Oberseite der Cubic Mouse erlauben die Vergrößerung bzw. Verkleine-rung des Modells. Ein weiterer Knopf fungiert als Kupplung und entkoppelt das Modell von der Bewegung der Cubic Mouse, um diese bei Bedarf zur Seite legen zu können. Die Cubic Mouse verfügt außerdem über drei verschiebbare, senkrecht aufeinanderstehende Stäbe, die zur Festlegung von Schnittebenen in der Seismik verwandt werden.

4. SEISMISCHE DATEN

Nach dem Bearbeiten der Rohdaten liegt die 3-D Seismik als regelmäßiges Gitter vor, dessen Knoten den Betrag des zugehörigen akustischen Signals enthalten. Zur Echtzeitvisualisierung speichern wir die Seismik in einer 3D-Textur und ordnen der Signalstärke eine Farbtabelle zu, so daß z.B. stark negative Ausschläge rot erscheinen und stark positive blau. Abbildung 5 zeigt drei senkrecht zueinander stehende Schnitte durch einen so kolorierten seismischen Datensatz. Die Schnitte können in Echtzeit mit

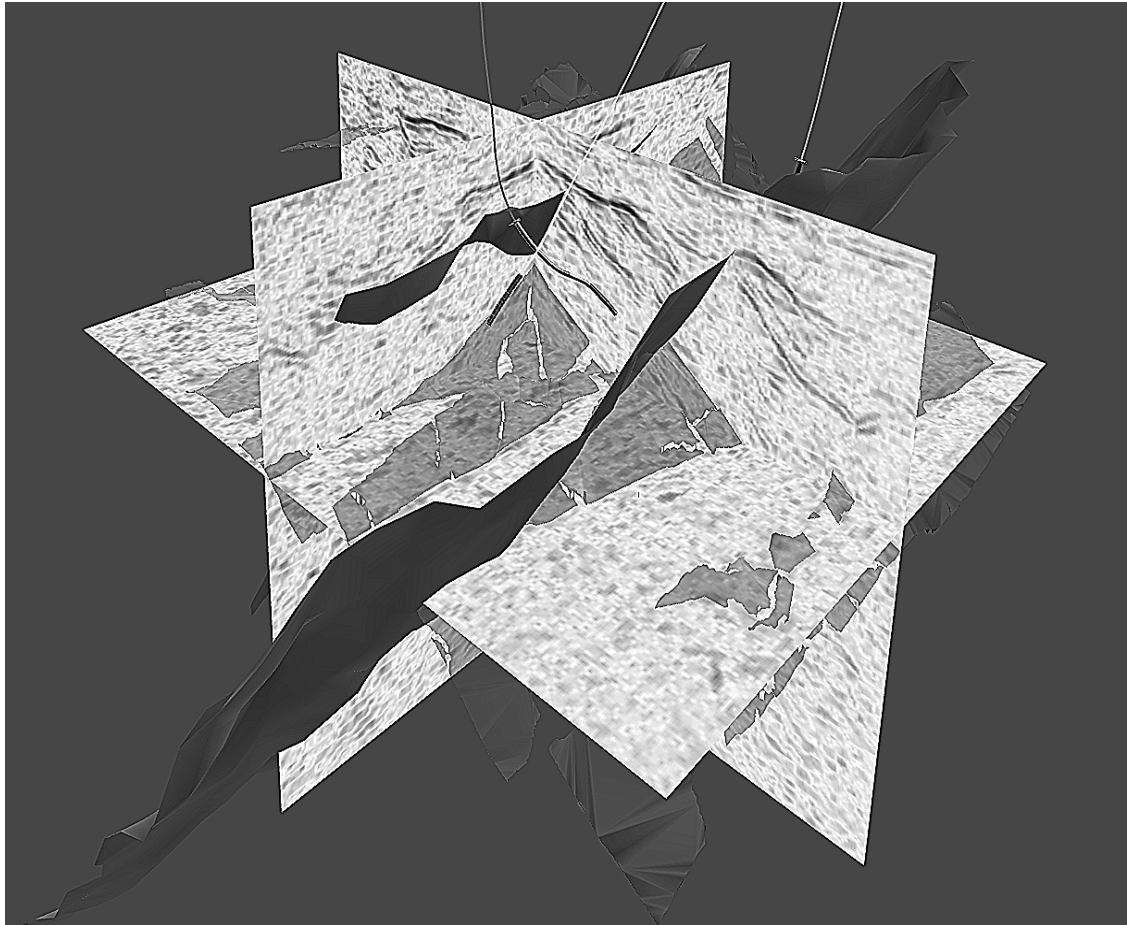


Abb. 5: Visualisierung seismischer Daten mit drei senkrecht zueinanderstehenden Schnittebenen, den sogenannten Crossline-, Inline-, und Timeslices.

Hilfe der korrespondierenden Stäbe der Cubic Mouse durch den Datensatz bewegt werden. Da die Orientierung der Cubic Mouse und der 3D-Seismik immer übereinstimmen, sind die Stäbe zu jeder Zeit senkrecht auf den Schnittebenen. Dadurch kann die Cubic Mouse bedient werden ohne sie anzusehen. Statt dessen kann man sich alleine auf den Datensatz konzentrieren.

Neben den drei zu dem Koordinatensystem ausgerichteten Schnittebenen kann auch noch eine freie Ebene durch die Seismik bewegt werden, die eine Betrachtung schiefer Schnitte durch die Daten ermöglicht. Diese zusätzliche Schnittebene ist ein virtuelles Werkzeug, dessen Ausrichtung und Lage im Raum mit der Hand gesteuert wird.

Die direkte Volumenvisualisierung ist eine Alternative zur Darstellung eines Volumens durch Schnittebenen. In unserem System haben wir die Möglichkeit eine würfelförmige, magische Lupe (magic lens) durch das Modell zu bewegen, welche die Seismik in ihrem Inneren durch direkte

Volumenvisualisierung darstellt (Abb. 6). Innerhalb der Lupe sieht man nur die Extremwerte der Seismik, welche die Reflektoren kennzeichnen. Der dazwischen liegende Bereich bleibt transparent. Auf diese Weise gewinnt der Betrachter sehr schnell einen Eindruck vom räumlichen Verlauf der Grenzflächen.

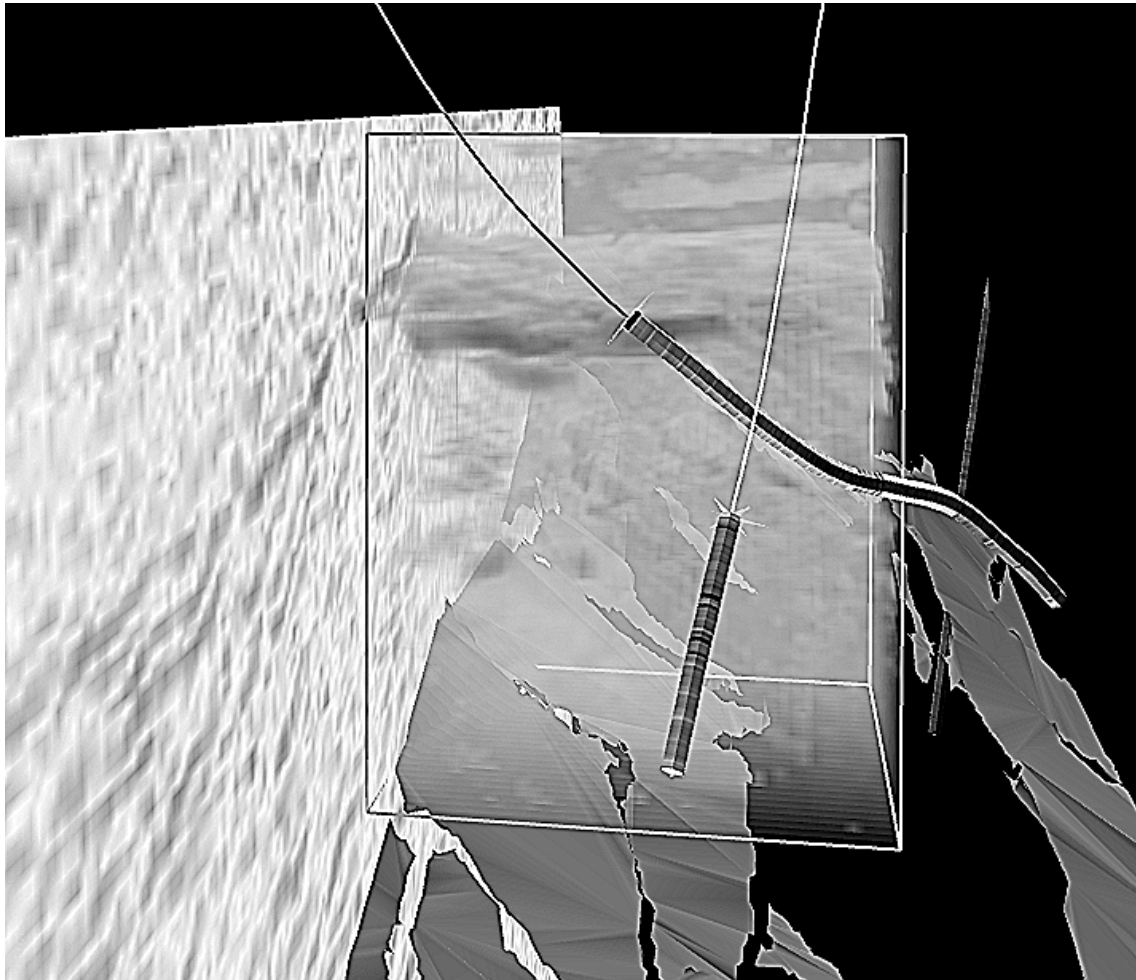


Abb. 6: Die Volume-Rendering-Lupe. Innerhalb eines würfelförmigen Bereiches erfolgt eine Volumendarstellung auf Basis der seismischen Daten. Man erkennt deutlich den Verlauf der Reflektoren im Untergrund. Im Vordergrund verlaufen zwei Bohrlöcher, an deren Enden farbkodierte Logdaten zu sehen sind.

5. BOHRLOCHDATEN

In Bohrlöchern werden meist mehrere Messungen nacheinander durchgeführt. Eine gleichzeitige Visualisierung der großen Anzahl verschiedener Parameter und der hohen Datendichte entlang des Bohrlochs überfordert den Betrachter. Wir erproben daher Visualisierung und Sonifizierung miteinander zu verbinden und so die Bandbreite zu erweitern.

Generell kann man zwischen Skalar- und Vektordaten unterscheiden. Die Darstellung skalarer Daten erfolgt durch Farbkodierung entlang des Bohrlochpfades. Der Verlauf der Bohrlöcher wird als Röhre dargestellt. Durch eine bivariate Farbkodierung lassen sich zwei Parameter gleichzeitig darstellen: Ein Parameter wird dem Blauwert zugeordnet, der Zweite dem Rot- und Grünwert. Bei linearer Korrelation der Meßwerte ergibt sich ein Grauton, sonst dominiert der Farbton des jeweils höheren Wertes. Zur Betrachtung einer Logkurve oder zur Darstellung eines weiteren Parameters besteht die Möglichkeit ein neben dem Bohrloch befindliches, kurzes Panel auf und ab zu bewegen. Abbildung 7 zeigt ein Lehrbuchbeispiel für drei Bohrlochmessungen aus einem Kalksteinreservoir (nach Selley, 1998) als klassischer Log-Plot und unsere 3-D Visualisierung.

Die Sonifizierung basiert auf dem Konzept des Geigerzählers und ist an das bewegliche Panel gekoppelt, das zu einer Art Stethoskop zum Abhören des Well-Logs wird. Geigerzähler sind bekannt und jedem Benutzer sehr leicht zu erklären. Schnell getaktete Töne zeigen hohe Werte des entsprechenden Parameters an, langsam getaktete entsprechend niedrige. Das Auswählen der verschiedenen Parameter für die Visualisierung und Sonifizierung erfolgt mit einer runden Wahlscheibe. Die Töne sind für die einzelnen Parameter jeweils aus der auf der Wahlscheibe angezeigten Richtung wahrnehmbar. So kann der Benutzer mehrere Parameter gleichzeitig hören und diese korrekt zuordnen. Die Tonrepräsentation ermöglicht eine höhere Datendichte auditiv wahrzunehmen, als sie visuell wahrnehmbar wäre. Aus diesem Grund werden die Datensätze mit verschiedenen Auflösungen bereitgestellt und je nach Geschwindigkeit des Panels die entsprechende ausgewählt.

Ein Beispiel für Vektordaten sind Messungen eines Dipmeters, die das Streichen und Fallen der jeweiligen Materialschicht anzeigen. Diese Messungen werden oft für die Analyse sedimentärer Strukturen eingesetzt (Serra, 1985), können aber auch zur Bestimmung von kleinräumigen Verwerfungen dienen, die wegen ihrer geringen Ausdehnung mit der

Seismik nicht mehr zu erfassen sind (Adams et al., 1992). Vektordaten werden als Pfeile entlang des Bohrloches dargestellt (Abb. 8). Auf diese Weise lässt sich sehr schnell erkennen, ob die Richtung des Schichteinfalls homogen ist, und wie sie sich im räumlichen Kontext ändert.

Für die Sonifizierung der Vektordaten wird der Benutzer im Zentrum des Bohrlochs angenommen. Er hört einen Ton jeweils aus der Richtung des Schichteinfalls. Wird ein Datenbereich sonifiziert und das Schichtfallen verläuft im gesamten Bereich homogen in eine Richtung, so nimmt er die Töne geschlossen aus einer Richtung wahr. Fallen die Schichten bevorzugt in eine Richtung, streuen aber stark, so werden die Klangquellen diffus aus dieser Richtung wahrgenommen. Falls es keine bevorzugte Einfallsrichtung gibt, fühlt man sich von den Klangquellen umgeben. Die Sonifizierung ist somit eine Art interaktives Äquivalent zur klassischen Betrachtung solcher Daten in Rosendiagrammen bzw. Stereonetzen.

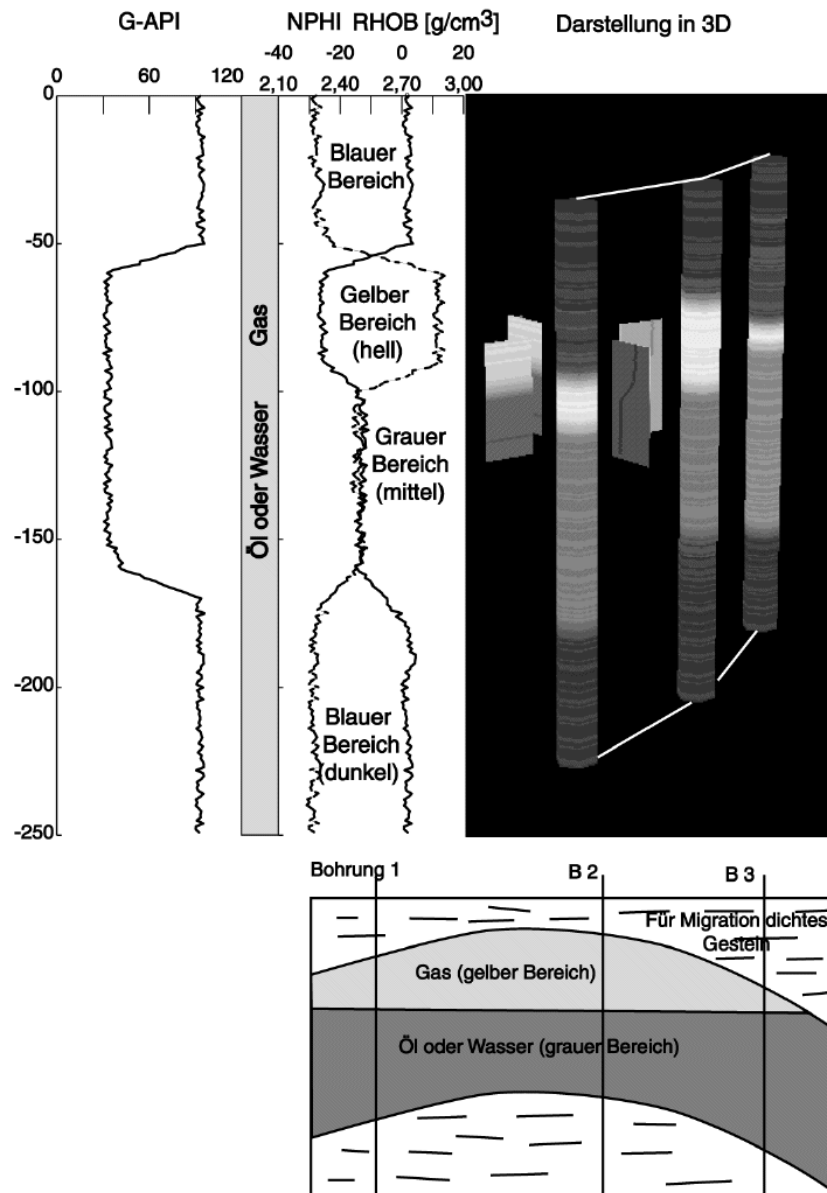
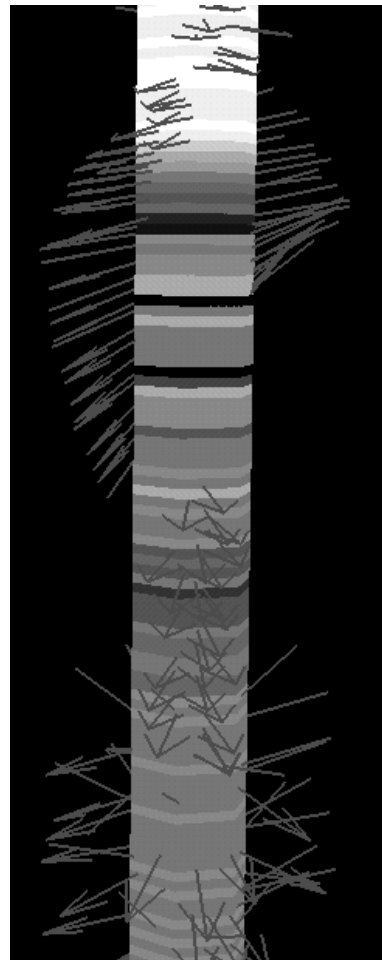


Abb. 7: Logplot vs. 3D-Darstellung. Auf der linken Seite sieht man den klassischen Logplot mit Gamma Ray (G-API) , Neutron-Porosity (NPHI) und Dichte (RHOB). Auf der rechten Seite die korrespondierende 3D-Visualisierung. NPHI ist gelb eingefärbt, und die Dichte blau. Der helle Bereich auf den Bohrlöchern entspricht den hohen NPHI Werten und zeigt evtl. Gas an. Der Bereich darunter ist grau, da NPHI und RHOB beide mittlere Werte haben, was entweder Öl oder Wasser anzeigt. In der schematischen Zeichnung ist die Mächtigkeitsveränderung des gas- bzw. fluidhaltigen Bereichs angezeigt. Diese ist auch in der 3D-Darstellung sehr gut zu erkennen.

Abb. 8: Darstellung von Vektordaten entlang der Bohrlöcher.

Ursprünglich erfolgte die Bewegung des Visualisierungspanels mit einem Strahl, der von dem Zeigestift in der Hand des Benutzers ausging. Das Panel folgte hierbei jeweils dem Kreuzungspunkt zwischen Zeigestrahl und Bohrloch. Dieser Ansatz erwies sich jedoch als zu ungenau, da es sehr schwer war im virtuellen Raum das Bohrloch genau an der gewünschten Stelle zu treffen. Ein neuer Ansatz verwendet ein Schiebepotentiometer, das die Bewegungsgeschwindigkeit der Linse entlang des Bohrloches steuert und wesentlich besser funktioniert.

Zur groben Bohrlochplanung in Abhängigkeit von der geologischen Interpretation und den geophysikalischen Daten besteht die Möglichkeit mit dem Zeigestift Bohrlochpfade in den Raum zu zeichnen. Diese können nachträglich editiert und den Gegebenheiten angepaßt werden. Eine Farbkodierung zeigt die Krümmung an, da diese später beim Bohren Beschränkungen unterliegt.



6. GEOLOGISCHE INTERPRETATION

Geologische Störungen und stratigrafische Horizonte werden als Dreiecksnetze repräsentiert. Aus Geschwindigkeitsgründen läßt sich die Auflösung zwischen einer feinen und einer groben Version umschalten. Zusätzlich können Farbe und Transparenz interaktiv verändert werden. Außerdem arbeiten wir an einer Reihe virtuellen Werkzeuge zur nachträglichen Bearbeitung der durch die geologische Interpretation gewonnenen Oberflächen. Unregelmäßigkeiten in den Oberflächen lassen sich so z.B. mit einem Glättungswerkzeug beseitigen und Horizonte durch Verschiebung der Ankerpunkte editieren. In diesem Kontext ist noch ein virtuelles Werkzeug wichtig, das Teile des Modells entfernt und somit Zugang zu verdeckten Strukturen ermöglicht

7. ERGEBNISSE UND ZUKÜNFTIGE ARBEITEN

Der vorgestellte Prototyp integriert 3D-Seismik und Bohrlochdaten mit der geologischen Interpretation und macht die teilweise multivariaten Daten interaktiv zugänglich. Die Verwendung großflächiger, stereoskopischer Projektionssysteme ermöglicht dem Benutzer den räumlichen Zusammenhang der oft komplexen dreidimensionalen Strukturen zu klären und die enorme Datenmenge zu bewältigen. Die einfachen Interaktionskonzepte und insbesondere die „Cubic Mouse“ machen das System intuitiv bedienbar ohne beim Benutzer umfangreiche Erfahrung mit virtuellen Umgebungen vorauszusetzen. Die kombinierte Verwendung der Sonifizierung und Visualisierung zur Exploration von Bohrlochdaten erweist sich als zusätzliches Potential, das kommerzielle Interpretationssysteme bisher nicht nutzen.

Das bisherige System ist hauptsächlich zur Validierung interpretierter Daten geeignet. Eine Herausforderung ist es die Interpretation direkt in der virtuellen Umgebung zu unterstützen und Methoden für das Erstellen und Bearbeiten von Modellen im dreidimensionalen Raum zu entwickeln.

Ein weiterer Schwerpunkt unserer zukünftigen Arbeiten wird die Erweiterung unseres Systems in Richtung „Umweltgeophysik“ sein, bei der es noch eine wesentlich größere Anzahl geophysikalischer Verfahren gibt, deren Ergebnisse integriert und evaluiert werden müssen (Reynolds, 1997).

DANKSAGUNG

Die vorgestellten Arbeiten wurden finanziell vom VRGeo Konsortium unterstützt. Wir möchten uns hiermit bei allen Mitgliedern des Konsortiums für ihre Diskussionsbeiträge bedanken. Die Firmen BHP, Statoil, Landmark und Mobil haben uns freundlicher Weise das notwendige Datenmaterial zur Verfügung gestellt. Ganz besonders danken wir Keith Nesbitt für seine Hilfe am Anfang des Projektes und Trond Bergø für die Vorschläge und Beratung während seines Aufenthaltes bei uns. Ferner danken wir Michael Tirtasana für die Integration der Volumendatensätze, Rhadames Carmona für die Implementierung verschiedener Werkzeuge zur Bearbeitung von Dreiecksnetzen, Petra Unnützer für das Korrekturlesen und dem Rest der Arbeitsgruppe Virtuelle Environments für ihre stetige Unterstützung.

LITERATUR

- Adams, J. T., Azodele, J. K., Bedford, J., Kaars-Sijpesteijn, C. H. & Watts, N. L. (1992): Application of dipmeter data in structural interpretation, Niger Delta. In: Geological Applications of Wireline Logs II, Geological Society Special Publications No 65, pp.247-264
- Cruz-Neira, C., Sandin, D.J., DeFanti, T.A. (1993): Surround-screen Projection-based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE, SIGGRAPH '93, S. 135-142
- Green, A., Lanz, E., Maurer, H., Börner, D. (1999): A template for geophysical investigations of small landfills. The Leading Edge, 2.99, SEG, Tulsa
- Krüger, W., Fröhlich, B. (1994): The Responsive Workbench, IEEE Computer Graphics and Applications: 12-15, May 1994
- Loftin, B. et al (1999): Immersive Data Visualization in the Geosciences, International Immersive Technology Workshop, Stuttgart, May 1999, Springer-Verlag
- Reynolds, J. M. (1997): An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, Wiley
- Sambuelli, L., Socco, L. V., Brecciaroli, L. (1999): Acquisition and processing of electric, magnetic, and GPR data on a Roman site, Journal of Applied Geophysics 41, S.189-204, Elsevier, Amsterdam
- Selley, R. C. (1998): Elements of Petroleum Geology, Academic Press
- Serra, O. (1985): Sedimentary Environments from Wireline Logs, Schlumberger
- Sheriff, R. E. (1992): Reservoir Geophysics. Investigations in Geophysics No.7, SEG, Tulsa
- Stevenson, D. S., Smith, K. A., McLaughlin, J., Gunn, C., Veldkamp, J., Dixon, M. (1999): Haptic Workbench, A multi-sensory virtual environment. In Proceedings of the SPIE Conference on Stereoscopic Display and Virtual Reality Systems IV Vol. No. 3295, San Jose, January 1999
- Tramberend, H. (1999): Avocado: A Distributed Virtual Reality Framework, Virtual Reality 99 Conference, Houston, Texas, March 1999, IEEE Computer Society
- Tramberend, H., Hasenbrink, F., Fröhlich, B. (1999): Tools, Mediators, and Interaction Operators: A Concept for Interaction in Virtual

Environments, International Immersive Technology Workshop,
Stuttgart, May 1999, Springer-Verlag